

杨馥宁,吕萍,马芳,等.腾格里沙漠南部格状沙丘的形态演变及移动特征[J].中国沙漠,2023,43(1):107-115.

## 腾格里沙漠南部格状沙丘的 形态演变及移动特征

杨馥宁<sup>1</sup>,吕萍<sup>1</sup>,马芳<sup>1</sup>,曹敏<sup>1</sup>,肖南<sup>2</sup>,顾立霞<sup>1</sup>,杨迎<sup>1</sup>

(1.陕西师范大学地理科学与旅游学院,陕西西安710119;2.内蒙古师范大学地理科学学院,内蒙古呼和浩特010022)

**摘要:**沙丘的形态变化与移动蕴含区域风沙环境和地貌演化的关键信息,是风沙地貌研究的重要内容。以腾格里沙漠南缘的长格状和方格状沙丘为研究对象,利用风况资料和Google Earth卫星影像,监测2009—2020年两种格状沙丘的形态变化并分析其移动特征。结果表明:(1)腾格里沙漠西南缘和东南缘的主风向均为西北风,长格状沙丘分布区的次风向为东南风,方格状沙丘分布区次风向为东风和东南风,都属于低风能环境、中变率风况。西南部风能环境大于东南部,研究区近10年风动力呈衰减趋势。(2)格状沙丘的主副梁长度和间距在增加,其中,长格状沙丘高度增加,方格状沙丘高度在降低。沙丘主梁向东偏移,副梁向南偏移,形态整体保持稳定。(3)长格状沙丘平均移动速率为 $1.57\sim 1.71\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ ,方格状沙丘平均移动速率为 $1.63\sim 2.01\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ ,沙丘平均移动方向与合成输沙方向基本一致,沙丘的体积是造成移动速率差异的主因。

**关键词:**沙丘移动;格状沙丘;沙丘形态演变;风况;腾格里沙漠

文章编号:1000-694X(2023)01-107-09

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00106

中图分类号:P931.3

文献标志码:A

### 0 引言

格状沙丘由两组纵横交叉的沙丘组成,平面呈网格状,在世界沙漠中分布较为广泛<sup>[1]</sup>,火星上也有分布<sup>[2]</sup>。格状沙丘在中国主要分布在腾格里沙漠的东部和南部及库布齐沙漠的中部<sup>[3]</sup>,在撒哈拉沙漠的部分地区、纳米布沙漠和阿拉伯半岛伊拉克地区也有分布。许多学者对格状沙丘的成因和形态特征进行了研究。Cooper<sup>[4]</sup>认为格状沙丘是横向沙丘在单向风的环境下兽角部分顺风向延伸形成了与主梁基本垂直的副梁。Wilson<sup>[5]</sup>提出格状沙丘是在横向气流与纵向气流相互作用下形成的。邸耀全等<sup>[6]</sup>提出主梁是在主风作用下形成的横向新月形沙丘链,与主风基本垂直的次风形成了副梁。哈斯等<sup>[7]</sup>则认为主风影响主梁的形成,副梁是在主风和次风的交替作用下形成的,在两组风的共同作用下维持沙丘形态。

沙丘的形态变化可以反映其形成过程以及区

域风况和输沙强度的变化<sup>[8]</sup>,格状沙丘随着沙源供应的增加会向金字塔沙丘过渡<sup>[9]</sup>。在沙丘移动方面,凌裕泉等<sup>[10]</sup>通过野外观测收集了栅栏平均阻沙量计算沙丘的前移速度。邸耀全等<sup>[6]</sup>利用风洞实验得到沙丘主梁前移量。屈建军等<sup>[11]</sup>结合输沙量对格状沙丘纵断面的形态变化和移动进行分析,发现沙丘移动速度为 $1.483\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 。近年来格状沙丘吸引了更多学者的关注,不过研究主要在沙丘内部的沉积构造<sup>[12]</sup>、粒度特征<sup>[13]</sup>和风能环境<sup>[14-16]</sup>方面,很少有对其动态变化过程研究的报道。

鉴于此,本文以腾格里沙漠南部的格状沙丘为研究对象,选择研究区临近两个气象站的多年风速风向数据,并利用Google Earth卫星影像资料监测沙丘的形态变化,进一步探讨腾格里沙漠南缘的风况与沙丘形态变化及移动过程的关系。研究结果旨在丰富区域风沙地貌内容,为减少沙丘移动对沿线铁路及防护体系的威胁及深入认识格状沙丘的演化过程提供理论依据。

收稿日期:2022-07-01;改回日期:2022-07-31

资助项目:国家自然科学基金项目(41871011)

作者简介:杨馥宁(1998—),女,陕西西安人,硕士研究生,研究方向为风沙地貌学。E-mail: yangfuning1003@163.com

通信作者:吕萍(E-mail: lvping@lzb.ac.cn)

## 1 研究区概况

腾格里沙漠位于阿拉善地区东南部,东抵贺兰山,西至雅布赖山,南接祁连山脉,面积约36 700 km<sup>2</sup>,是中国第四大沙漠<sup>[17]</sup>。以流动沙丘为主,包括格状沙丘、新月形沙丘和新月形沙丘链等。沙漠气候干旱,风沙活动强烈,年均降水量146.5 mm<sup>[18]</sup>,年均蒸发量1 500—2 000 mm,年均气温9.2 °C。境内植被以旱生

或中旱生的灌木或小半灌木为主,有猪毛菜(*Salsola collina*)、黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)等,在较低的流动沙丘迎风坡及背风坡下部,生长有圆头蒿(*Artemisia sphaerocephala*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)等<sup>[19]</sup>。根据格状沙丘形态上的差异,可将其分为长格状沙丘和方格状沙丘两类,主副梁间距比值小于1.2、大于0.8的沙丘称方格状沙丘,主副梁间距比值大于1.2的沙丘是长格状沙丘<sup>[17]</sup>(图1)。

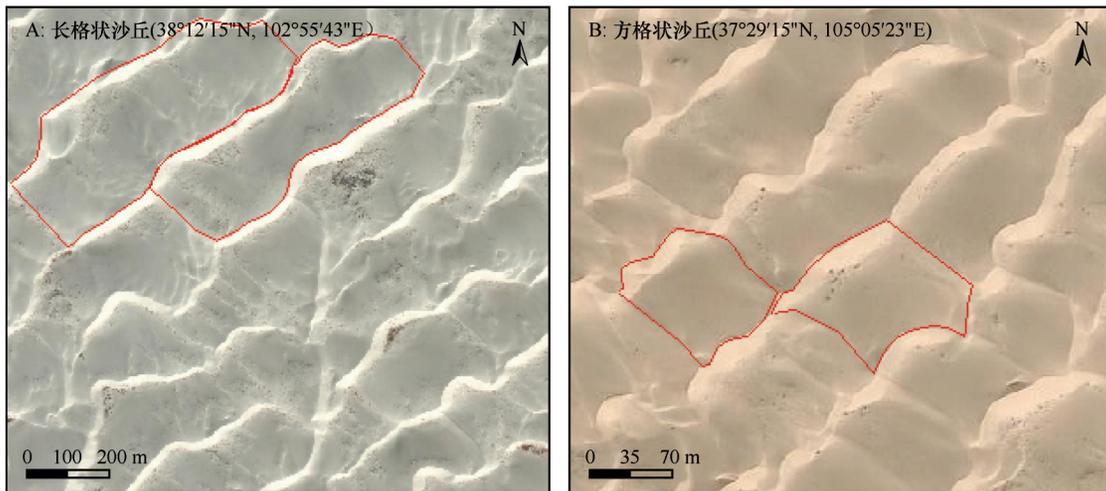


图1 格状沙丘的两种形态(卫星影像来自 Google Earth)

Fig.1 Two forms of reticulate dune(The satellite image are obtained from Google Earth)

研究区位于腾格里沙漠的南缘(图2)。长格状沙丘主要分布在沙漠西南缘邓马营湖附近。在沙漠东南缘沙坡头附近方格状沙丘分布较为集中,往东靠近沙漠边缘逐渐过渡为新月形沙丘链和平沙地。

## 2 研究方法

### 2.1 风况

风是塑造沙丘形态的主要动力<sup>[20]</sup>。对于长格状沙丘,选取民勤气象站(2009年1月至2020年12月)的风况数据,数据来源于美国国家气候数据中心(NCDC, <https://www.ncei.noaa.gov>),采集时间间隔为3 h;沙漠东南部的风况数据来源于中国科学院风沙科学观测场,采集间隔为1 min。由于观测时间较短,无法获取2009—2020年连续的风速观测资料,由此选取了2018—2020年的风况资料进行分析。输沙势反映某一方位起沙风在一定时间内搬运沙的能力,是衡量一个区域风沙活动强度及风能环境分类的重要指标<sup>[21]</sup>,采用Fryberger等<sup>[22]</sup>的计算方法:

$$DP = V^2 (V - V_t)t$$

式中:DP为输沙势,用矢量单位VU来表示;V和V<sub>t</sub>分别是10 m高度的起沙风速和起动风速,单位为节;t表示起沙风(V)出现的频率。RDP是输沙玫瑰图中各个方向输沙势的矢量合成;RDD为合成输沙势的方向,表示区域沙搬运的总体方向;RDP/DP为风向变率反映起沙风的单一程度。根据已有研究成果,研究区2 m高度起动风速为5 m·s<sup>-1</sup><sup>[16]</sup>。

### 2.2 沙丘的形态变化

沙丘的形态和分布格局对区域风沙环境有着重要的指示意义<sup>[23]</sup>。格状沙丘的形态主要通过Google Earth高清影像目视解译量取。为了消除卫星历史影像的偏移,在测量中选择周边多个固定点(灌丛植被、建筑物、道路等)作为参照物,对多期影像进行配准校正,以获取更为精确的沙丘形态参数和移动特征。形态参数包括主副梁长度(L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>)、主梁高度(H)、主副梁走向(T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>)以及主副梁间距(S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>,图3)。沙丘主梁高度(H)无法直接测量,所以采用经验公式进行估算:

$$H = L_D \times \tan 32^\circ$$

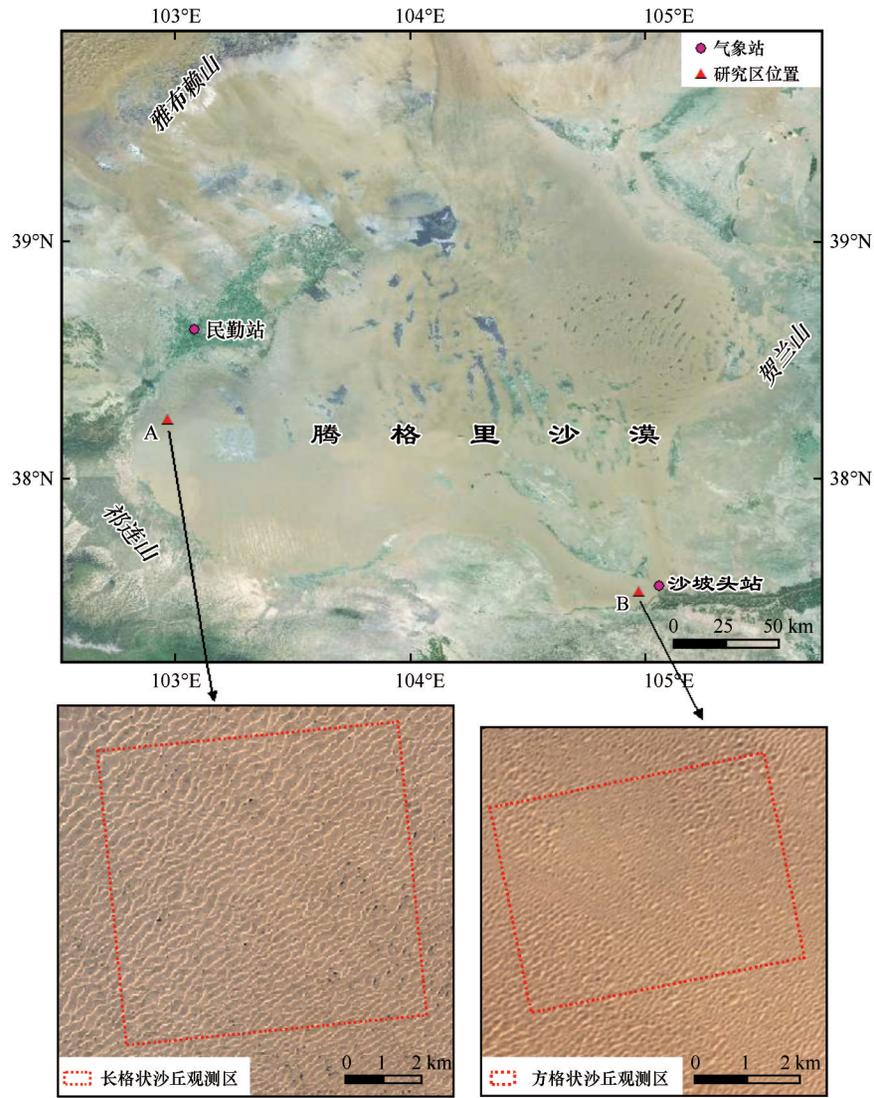


图 2 研究区地理位置(卫星影像来自 Google Earth)

Fig.2 The location of the study area(The satellite image are obtained from Google Earth)

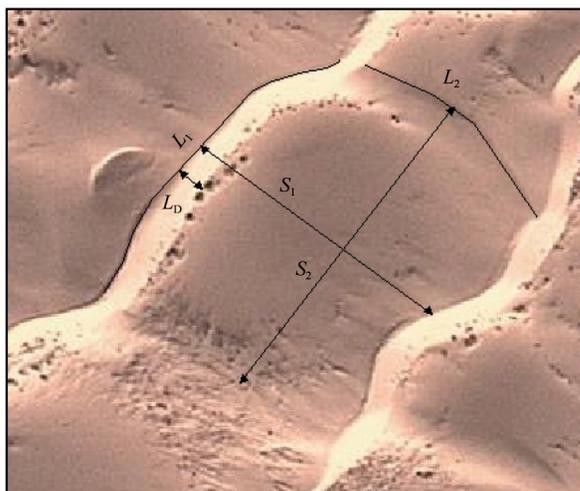


图 3 沙丘形态参数示意图

Fig.3 Schematic diagram of morphological parameters of reticulate dunes

式中： $32^\circ$ 为格状沙丘背风坡的休止角<sup>[11]</sup>； $L_0$ 为主梁背风坡的水平长度。

本文选取 2009—2020 年 3 期高清影像进行对比,以获取两种类型沙丘的形态变化及移动特征。由于不同区域缓存历史影像的时间节点不同,所选影像的时间间隔只能尽可能保持一致。样区 A 所选的影像分别为 2010、2014、2020 年,样区 B 选取 2009、2015、2020 年。在每个样区内均匀选取 40 个典型沙丘进行测量,样区 A 分布着长格状沙丘,样区 B 是方格状沙丘分布区。对沙丘的移动特征测量时,选取主副梁端点之间对角线的交点作为特征点(图 4),记录其在两期影像间隔时间移动的距离( $d$ )和方位( $\theta$ )。

$$\text{沙丘移动速率} = d/t$$

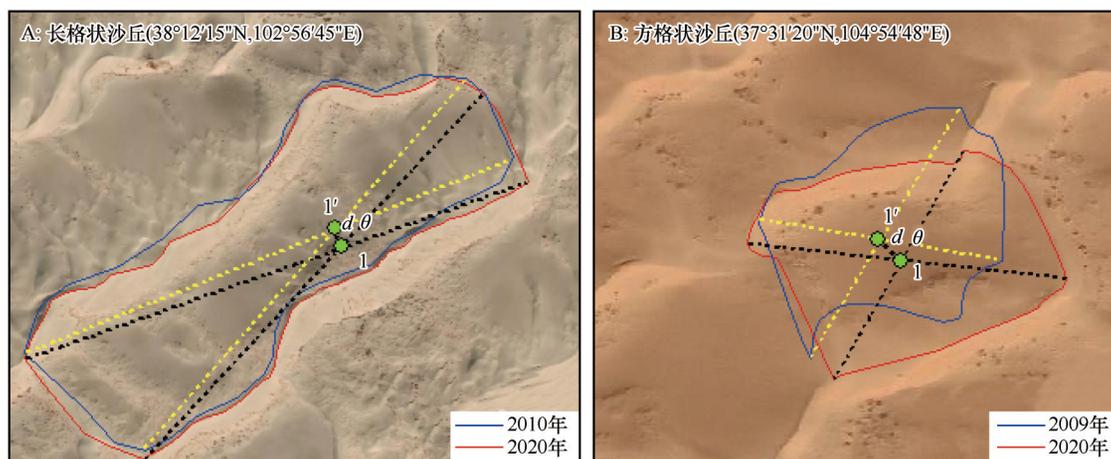


图4 格状沙丘的移动方向和距离

Fig.4 The migration and direction of reticulate dunes

移动方向= $\theta$

式中: $t$ 表示两期影像的时间间隔,单位a。

### 3 结果与分析

#### 3.1 风况特征

##### 3.1.1 风速变化

2009—2020年民勤站年平均风速和起沙风频率存在差异(图5)。民勤站年平均风速为 $2.54\sim 2.97\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,整体波动较小。年平均风速最大值出现在2010年,为 $2.97\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,最小值在2020年,为 $2.54\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。年平均起沙风频率为 $4.3\%\sim 10.75\%$ ,最大值和最小值分别在2010年和2020年,2016—2020年起沙风频率呈下降趋势。沙坡头气象站2018—2020年

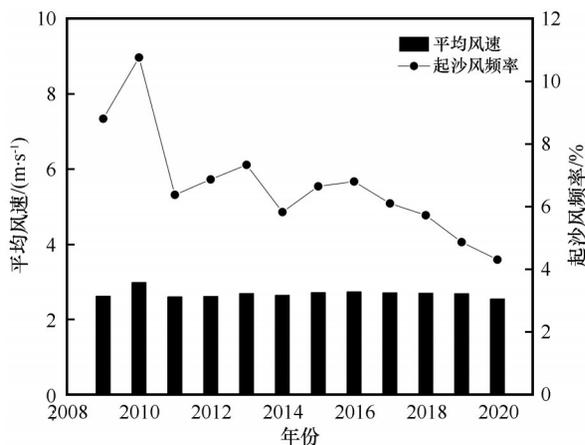


图5 2009—2020年民勤站平均风速与起沙风频率的  
年际变化

Fig.5 Interannual variation of average wind velocity and frequency of sand-blowing wind at Minqin Meteorological Station from 2009 to 2020

平均风速为 $2.29\sim 3.92\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,年平均起沙风频率为 $7.27\%\sim 12.6\%$ 。

##### 3.1.2 起沙风风向变化

起沙风影响着沙丘的形成规模和移动速度<sup>[17]</sup>。据腾格里沙漠南部周边的气象资料,该区域存在明显的主次风,风向较为复杂(图6)。沙坡头年起沙风的主风向为西北风(WNW、NW、NNW),频率为 $49.44\%$ ,其中NW方向的频率最大,为 $21.97\%$ 。其次是东风(E)频率为 $17.24\%$ ,再次是东南风(ESE、SE、SSE)频率为 $13.02\%$ 。在其余各风向中西南风(WSW、SW、SSW)和西风(W)的频率较为接近,分别为 $6.73\%$ 和 $7.52\%$ 。民勤气象站风向也是以西北风为主,占全年起沙风的 $67.67\%$ 。其次是东南风,频率为 $12.9\%$ 。综上,二者的主风向相同但次风向不同,且与西南部的民勤气象站相比,东南部沙坡头区域风向更为复杂。

##### 3.1.3 输沙势

沙坡头的年输沙势为 $59.94\text{ VU}$ ,合成输沙势为 $28.33\text{ VU}$ ,风向变率 $RDP/DP$ 为 $0.47$ ,属于低风能环境、中风向变率(图7)。主导输沙方向集中在NW方向,为 $20.84\text{ VU}$ ,其次是WNW方向,为 $12.06\text{ VU}$ ,再次是E方向,为 $10.38\text{ VU}$ 。民勤年输沙势为 $80.47\text{ VU}$ ,合成输沙势为 $62.37\text{ VU}$ ,也属于低风能环境,风向变率属于中变率,为钝双峰风况。以WNW方向的输沙势最大,为 $40.87\text{ VU}$ ,其次为NW方向,为 $20.78\text{ VU}$ ,ESE、W和NNW方向风力相当,分别为 $4.36\text{ VU}$ 、 $6.23\text{ VU}$ 和 $4.14\text{ VU}$ 。从以上结果看,民勤的年输沙势更大。沙坡头和民勤在不同方向上输沙势不同,但主导输沙方向大致都为东南方向。

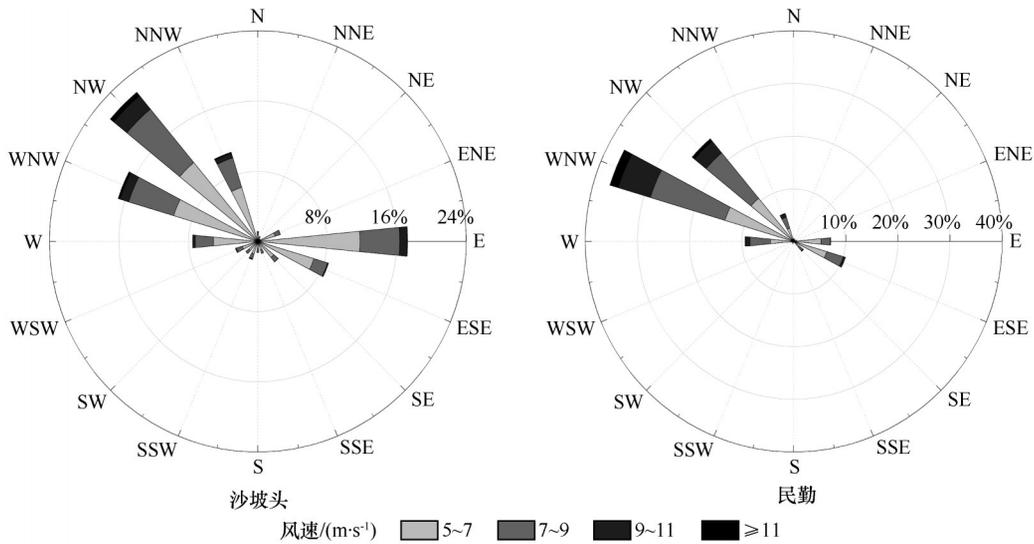


图 6 全年起沙风风频玫瑰图

Fig.6 Sand driving wind rose in whole year of study area

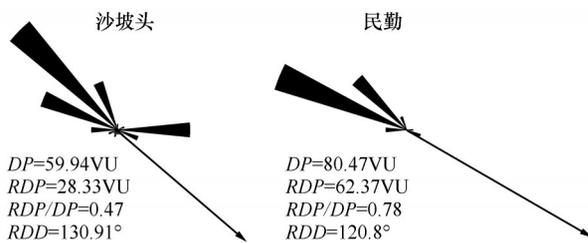


图 7 研究区东南缘(沙坡头)和西南缘(民勤)年输沙势

Fig.7 Annual drift potential in the southeast and southwest of study area

输沙势和输沙方向的年际变化影响沙丘的移动方向。民勤站 2009—2020 年输沙势呈现波动下降的趋势,合成输沙方向呈现先增大后减小又增大的规律,在 2009—2015 年和 2017—2020 年两个时间段内,研究区西南部合成输沙方向增加,在 2015—2017 年合成输沙方向减小(图 8)。

### 3.2 沙丘的形态变化

在 2010—2014 年和 2014—2020 年,长格状沙丘的主副梁长度、主副梁间距和主梁高度均呈现增加趋势,在 2009—2015 年和 2015—2020 年,方格状沙丘主副梁长度和主副梁间距也呈现增加趋势,而沙丘高度在 2009—2015 年降低,在 2015—2020 年变化不大(表 1)。形态测量结果显示,85%(34 个)的长格状沙丘主梁长度增加,72.5%(29 个)副梁长度增加,有 67.5%(27 个)的沙丘主梁间距增加,75%(30 个)副梁间距增加。方格状沙丘有 77.5%(31 个)的主梁长度增加,82.5%(33 个)副梁长度增加,80%(32 个)的主梁间距增加,65%(26 个)副梁间距

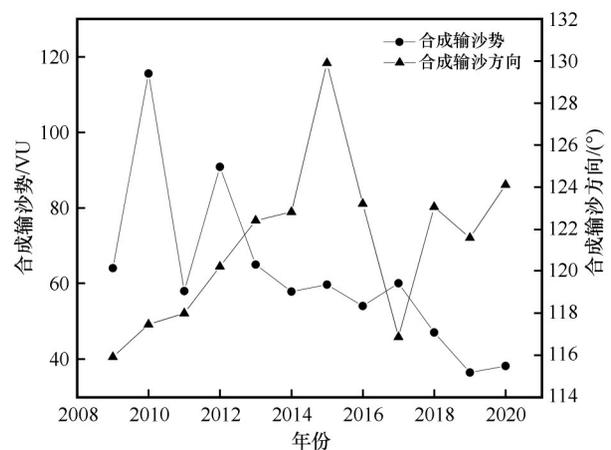


图 8 民勤 2009—2020 年风能环境变化

Fig.8 The variations in the wind energy at Minqin Meteorological Station from 2009 to 2020

增加。长格状沙丘高度平均值增加了 2.51 m,而方格状沙丘高度平均值从 8.39 m 降低为 6.64 m。两类沙丘主梁的增长率不同。其中,长格状沙丘主梁长度的增长率是方格状沙丘的 1.67 倍,副梁间距的增长率是方格状沙丘的 1.33 倍。从沙丘走向看,两类沙丘的主梁走向都有向东偏移的趋势,副梁走向向南偏移(沙丘走向角度增加),不过摆动幅度并不大,主梁走向与副梁走向仍然保持近乎垂直,由此近 10 年来格状沙丘的形态整体保持稳定。

### 3.3 沙丘的移动特征

#### 3.3.1 移动方向

长格状沙丘在 2010—2014 年移动方向为 44.1°~221.9°,平均移动方向为 142.6°,在 2014—2020 年,

表1 2009—2020年沙丘的形态参数(平均值±标准差)

Table 1 Morphometric parameters of dune during 2010 to 2020

沙丘类型	时间	主梁长度 ( $L_1$ )/m	主梁走向 ( $T_1$ )/(°)	副梁长度 ( $L_2$ )/m	副梁走向 ( $T_2$ )°	背风坡长度 ( $L_0$ )/m	主梁高度 ( $H$ )/m	主梁间距 ( $S_1$ )/m	副梁间距 ( $S_2$ )/m
长格状沙丘	2010年	435±152	47±9	146±33	141±12	25±4	16±4	158±37	424±151
	2014年	438±150	50±8	148±33	145±12	28±4	17±4	159±36	426±150
	2020年	440±152	51±8	149±34	148±12	29±4	18±4	160±36	428±150
方格状沙丘	2009年	76±21	42±10	67±17	134±11	14±4	8±2	73±19	72±21
	2015年	77±22	45±9	69±17	137±10	11±3	7±2	74±19	74±21
	2020年	79±21	47±9	70±18	140±10	11±3	7±2	75±18	75±21

沙丘移动方向为 $58.3^\circ\sim 209.4^\circ$ ,平均移动方向为 $136.7^\circ$ 。在2010—2020年沙丘移动方向呈现先向偏东南移动,再向偏东移动的趋势。方格状沙丘在2009—2015年移动方向为 $45.3^\circ\sim 332.4^\circ$ ,平均移动

方向为 $132.3^\circ$ ,在2015—2020年,沙丘移动方向为 $35.9^\circ\sim 213.2^\circ$ ,平均移动方向为 $128.5^\circ$ 。在2009—2020年沙丘移动方向呈现向偏东移动的趋势(表2)。

表2 腾格里沙漠两个样区的沙丘移动速率和方向(范围/平均值)

Table 2 Dune migration rate and direction of two plot in Tengger Desert

研究区	沙丘类型	监测时段	移动距离/m	移动速率/( $\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$ )	移动方向/(°)
西南部	长格状沙丘	2010—2014年	1.26~14.97/6.85	0.32~3.74/1.71	44.1~221.9/142.6
		2014—2020年	1.93~15.79/7.86	0.39~3.16/1.57	58.3~209.4/136.7
东南部	方格状沙丘	2009—2015年	3.06~22.82/12.86	0.48~3.57/2.01	45.3~332.4/132.3
		2015—2020年	1.71~16.62/8.97	0.31~3.02/1.63	35.9~213.2/128.5

### 3.3.2 移动速率

长格状沙丘平均移动速率为 $1.57\sim 1.71 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ ,方格状沙丘的平均移动速率为 $1.63\sim 2.01 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ (表2)。据研究,沙丘移动速度与输沙率成正比,而输沙率与起沙风速的立方成正比<sup>[24]</sup>。所以,如果沙丘体积不变,移动速度应与起沙风速的立方成正比。本研究结果表明西南部年输沙势大于东南部,但是东南部沙丘的移动速率快于西南部,与年输沙势不成正比,表明除风况外还有其他因素如沙源丰富度、植被、沙丘形态等造成沙丘移动速率的差异。

腾格里沙漠周围有雅布赖山、贺兰山和祁连山等,这为本区提供了丰富的沉积物来源。这些沙质沉积物在干燥的气候条件下被风吹蚀,为沙漠提供了丰富的沙源<sup>[19]</sup>。两个样区处于沙漠边缘,沙源较为充足,沙源丰富度相差不大,不足以引起移动速率的差异。植被状况也会影响沙丘的移动速率,但是腾格里沙漠植被种类单一,覆盖度较低,影响程度难以量化,不足以引起移动速率的较大差异。沙丘的形态学特征可能是造成移动速率差异的主要原因,沙丘高度可以间接代表沙丘体积<sup>[25]</sup>。据研究

沙丘的移动速度与高度呈现负相关关系( $P<0.05$ ,图9),与已有研究结果一致<sup>[26]</sup>。长格状沙丘的高度大于方格状沙丘,而且在研究期间长格状沙丘高度增加,方格状沙丘高度降低,在底面积不变的情况下,长格状沙丘体积增大,方格状沙丘体积减小,所以东南部沙丘的移动速率快于西南部。

## 4 讨论

腾格里沙漠位于现代中纬度西风和东亚季风边缘附近,研究区附近气象站点多年风况资料表明本区主风向为西北风,长格状沙丘分布区的次风向为东南风,而方格状沙丘分布区次风向为东风和东南风。研究区整体处于低风能环境、中等变率风况,可能是因为沙漠东部有贺兰山的阻挡,西北风在向东运行过程中,风向发生转向,由西北风转为东北风<sup>[19]</sup>,从而使得沙漠东南部风向变得复杂。

格状沙丘一般发育在沙源充足双向低风能环境下并且两个方向的风夹角在 $90^\circ$ 与 $135^\circ$ 之间<sup>[14,17]</sup>,本研究与前人的结论一致。从形态参数上看,两类沙丘主副梁脊线长度在近10年有增大的趋势,间距

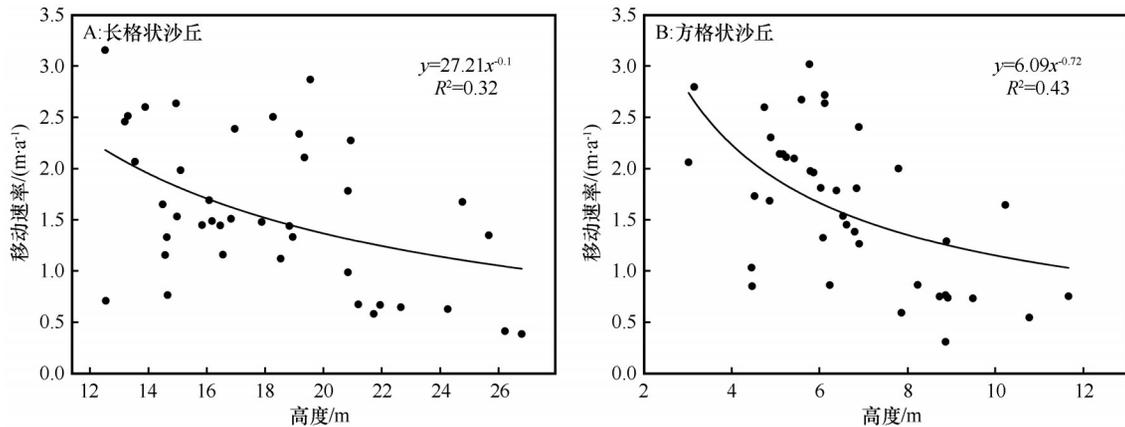


图9 沙丘移动速率与高度之间的关系

Fig.9 Relationship between migration rate and dune height

也随之增大。另外,两个区域沙丘的形态参数有所不同,这与输沙势有较大关系,由于西南部的风能环境大于东南部,所以长格状沙丘的主梁长度和间距要明显大于方格状沙丘<sup>[14]</sup>。从沙丘走向上看,两类沙丘的主梁向东偏移,副梁向南偏移。主梁在主风西北风的作用下形成,2009—2020年由于风向的变化,研究区西南部合成输沙方向由 $115.9^\circ$ 增大到了 $124.1^\circ$ ,主梁脊线的走向随风向而摆动(图8)。格状沙丘丘体高大,变化相对较慢,受西北风和东南风两组相反作用风的影响,沿年合成输沙方向移动且移动速度缓慢<sup>[27]</sup>,因此在研究期间沙丘形态基本保持稳定。

风况是影响沙丘移动的重要因素。方格状沙丘的平均移动方向与研究区年合成输沙方向大体一致,而长格状沙丘移动方向与年合成输沙方向的夹角最大达到了 $21.8^\circ$ ,相对于东南缘,西南缘沙丘移动方向有向南偏移的趋势。这主要是因为风的影响,在2009—2014年合成输沙方向增大,2015年达到了 $129.9^\circ$ 。因此沙丘移动方向随之增大(图8)。也可能与植被的固定作用有关,通过遥感影像目视解译可以看出长格状沙丘的迎风坡下部植被明显多于方格状沙丘,而植被会改变沙粒运动原有的运动轨迹,从而影响沙丘的移动方向和形态。此外,由于民勤气象站距离研究区较远,与实际的风动力可能存在差异。尽管如此,随着时间推移,沙丘的移动方向与合成输沙方向的夹角逐渐缩小,所以沙丘移动方向主要受风动力的影响。从移动速度上看,两类沙丘的移动速度在前半段较快,这是因为风速的影响,较大的风速能增加沙丘表面颗粒的运动速度和上升力,增大输沙量,促进沙丘移动<sup>[28]</sup>。

在2009—2014年,西南部合成输沙势和起沙风频率相对较大,随后逐渐减小(图5、图8),东南部2008—2011年合成输沙势为 $39.2 \text{ VU}^{[23]}$ ,与2018—2020年相比呈增大趋势,所以沙丘的移动速度2009—2014年较快,2015—2020年减慢。

沙丘移动的性质和强度受多种因素影响,除风况外还有其他因素影响沙丘的移动速率。沙丘本身的形态特征尤其是高度是影响沙丘移动速率的重要因素。在同一风况条件下,随着沙丘高度的增大,地表粗糙度也随之增加,运动过程中起沙风所要搬运的沙粒增多,使得沙丘移动速率降低。降水量、下伏地貌条件和沉积物性质等因素也会影响沙丘的移动速度,这在今后的研究中亟待分析。

## 5 结论

腾格里沙漠南部整体属于低风能环境、中等变率风况,起沙风主风向为西北风,长格状沙丘分布区的次风向为东南风,方格状沙丘分布区次风向为东风和东南风。合成输沙方向都为东南方向,二者相比,西南缘风向更单一,风能环境更强。研究区近10年合成输沙势(*RDP*)总体呈下降趋势。

2009—2020年,长格状沙丘的主副梁长度和主副梁间距在增加,方格状沙丘亦是如此。两类沙丘的主梁向东偏移,副梁向南偏移,主梁走向与副梁走向基本垂直,沙丘形态整体保持稳定。二者不同的是长格状沙丘高度增加而方格状沙丘高度降低,形态参数的变化速度也存在差异。

长格状沙丘平均移动速率为 $1.57\sim 1.71 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ ,方格状沙丘的平均移动速率为 $1.63\sim 2.01 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ ,方格状沙丘移动速度快于长格状沙丘,与输沙势不成

正比,可能是沙丘体积的影响,影响程度有待进一步研究。沙丘整体朝东南方向移动,与当地合成输沙方向大体一致。

### 参考文献:

- [1] Cook R, Warren A, Goudie A. Desert Geomorphology [M]. London, UK: UCL Press, 1994: 368-396.
- [2] 杨旭艳,董治宝,杨勤科,等.基于DEM的地球与火星格状沙丘对比分析[J].中国沙漠,2021,41(6):88-98.
- [3] 吴正,等.风沙地貌与治沙工程学[M].北京:科学出版社,2003:161-170.
- [4] Cooper W S. Coastal Sand Dunes of Oregon and Washington [M]. Baltimore, USA: Waverly Press, 1958.
- [5] Wilson I G. Desert sandflow basins and a model for the development of ergs [J]. Geographical Journal, 1971, 137: 180-199.
- [6] 邱耀全,王锡来,刘贤万.沙障工程防治格状沙丘前移的风洞实验研究[J].干旱区研究,1996(1):14-19.
- [7] 哈斯,董光荣,王贵勇.腾格里沙漠东南缘格状沙丘的形态-动力学研究[J].中国科学(D辑),1999(5):466-471.
- [8] 王宁波,李生宇,王海峰,等.塔克拉玛干沙漠腹地垄间地上覆沙丘形态的空间变化特征及其成因[J].干旱区地理,2014,37(1):89-96.
- [9] 张正德,董治宝.黑河流域中游沙漠风能环境与风沙地貌[J].中国沙漠,2014,34(2):332-341.
- [10] 凌裕泉,金炯,邹本功,等.栅栏在防止前沿积沙中的作用:以沙坡头地区为例[J].中国沙漠,1984,4(3):20-29.
- [11] 屈建军,凌裕泉,井哲帆,等.包兰铁路沙坡头段风沙运动规律及其与防护体系的相互作用[J].中国沙漠,2007,27(4):529-533.
- [12] 哈斯.腾格里沙漠东南缘格状沙丘沉积构造的解析[J].地学前缘,2004(1):277-278.
- [13] 哈斯.腾格里沙漠东南缘格状沙丘粒度特征与成因探讨[J].地理研究,1998(2):67-73.
- [14] 张正德,董治宝,钱广强,等.腾格里沙漠西部和西南部风能环境与风沙地貌[J].中国沙漠,2012,32(6):1528-1533.
- [15] 张正德,董治宝,赵爱国,等.沙漠地区风沙活动特征:以中国科学院风沙观测场为例[J].干旱区研究,2007(4):550-555.
- [16] 张克存,安志山,何明珠,等.乌海至玛沁高速公路中卫段风沙环境特征及沙害防治[J].干旱区地理,2021,44(4):983-991.
- [17] 刘英姿.腾格里沙漠中格状沙丘形态及成因研究[D].西安:陕西师范大学,2013.
- [18] 王炳尧,刘星辰,刘立超.1957—2017年腾格里沙漠地区降水量[J].中国沙漠,2020,40(4):163-170.
- [19] 文青.腾格里沙漠风沙地貌特征的空间变化[D].北京:中国科学院大学,2016.
- [20] 杨迎,吕萍,马芳,等.乌兰布和沙漠西南部风况对穹状沙丘形成的影响[J].中国沙漠,2021,41(2):19-26.
- [21] 梁准,吕萍,刘铮瑶,等.柴达木盆地鸭湖地区风况特征与雅丹地貌形态关系[J].中国沙漠,2020,40(5):42-48.
- [22] Fryberger S G, Dean G. Dune forms and wind regime [M]//A Study of Global Sand Seas. Washington, USA: US Government Printing Office, 1979: 137-169.
- [23] Lü P, Clement N, Dong Z B, et al. Emergence of oblique dunes in a landscape-scale experiment [J]. Nature Geoscience, 2014, 7(2): 31-31.10.
- [24] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes [M]. London, UK: Methuen, 1941.
- [25] 朱震达,陈治平,吴正,等.塔克拉玛干沙漠风沙地貌研究[M].北京:科学出版社,1981.
- [26] 杨军怀.塔克拉玛干沙漠沙丘移动研究[D].西安:陕西师范大学,2019.
- [27] 杨根生,张民力,高尚玉.腾格里沙漠格状沙丘地区公路筑路研究[J].干旱区资源与环境,1990(4):27-35.
- [28] 许明静,吕萍,肖南,等.毛乌素沙地西北部植被覆盖对沙丘移动的影响[J].中国沙漠,2020,40(4):71-80.

## Morphological evolution and migration characteristics of reticulate dunes at southern fringe of Tengger Desert

Yang Funing<sup>1</sup>, Lü Ping<sup>1</sup>, Ma Fang<sup>1</sup>, Cao Min<sup>1</sup>, Xiao Nan<sup>2</sup>, Gu Lixia<sup>1</sup>, Yang Ying<sup>1</sup>

(1.School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 2.College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China)

**Abstract:** The morphological change and migration of dunes contain the key information of regional aeolian environment and landform evolution, which is an important issue in aeolian geomorphology. In this paper, the rectangular dune networks and square dune networks in the southern edge of Tengger Desert are taken as an example, we used wind data and Google Earth satellite images to monitor the morphological changes of reticulate dunes from 2009 to 2020 and analyze their migration characteristics. The results showed that: (1) The prevailing wind direction in the southwest and southeast of Tengger Desert are northwest wind. The secondary wind direction in the distribution area of rectangular dune networks is southeast wind, and that of square dune networks is east wind and southeast. The wind regime features are belonging to low wind energy environment and intermediate wind direction variability. The wind energy environment in the southwest is stronger than that in the southeast. The wind power in the study area showed a decreasing trend in recent ten years. (2) The length and spacing of ridges of reticulate dunes are increasing, and the height of rectangular dune networks is increasing, while that of square dune networks is decreasing. The orientation of the primary ridge is shifted to the east, and the secondary ridge is shifted to the south, while the overall morphology of the dunes remains stable. (3) The average migration rate of rectangular dune networks is 1.57–1.71 m·a<sup>-1</sup>, and that of square dune networks is 1.63–2.01 m·a<sup>-1</sup>. The average migration direction of dunes is similar to the resultant drift direction. The volume of dune is the main reason affecting the difference of migration speed.

**Key words:** dune migration; reticulate dune; dune morphology evolution; wind regime; Tengger Desert